

Д. З. Вибе¹, Э. И. Воробьев^{2,3},
В. В. Акимкин¹, Я. Н. Павлюченков¹

¹Институт астрономии РАН

²НИИ физики, Южный федеральный университет

³Department of Astrophysics, University of Vienna

ЭПИЗОДИЧЕСКАЯ АККРЕЦИЯ И МОЛЕКУЛЯРНЫЙ СОСТАВ ПРОТОПЛАНЕТНЫХ ДИСКОВ

Считается, что планетные системы формируются в газопылевых дисках, окружающих молодые звезды. Эти протопланетные диски являются аккреционными, то есть их вещество постепенно приближается к звезде и падает на нее. Аккреция на звезду приводит к разогреву вещества в ее непосредственных окрестностях и генерации ультрафиолетового и рентгеновского излучения, что, в свою очередь, влияет на структуру диска. Есть немало свидетельств того, что темп аккреции со временем может испытывать значительные колебания, что приводит к появлению так называемых аккреционных вспышек светимости. Долговременные последствия этих вспышек могут сохраняться в диске в виде особенностей его молекулярного состава.

Planetary systems are believed to form in gas-dust disks, surrounding young stars. These protoplanetary disks are accretion disks, which means that matter in them gradually moves toward the star and eventually falls onto it. Accretion on the star heats gas in its immediate vicinity and generates ultraviolet and X-ray emission, which, in turn, influences the disk structure. There are numerous evidences in favor of significant variations in the accretion rate, causing the so-called accretion luminosity outburst. Long-term consequences of the outbursts can be retained in the disk as peculiarities in its molecular content.

Фуоры и эксоры

В 1936—1937 гг. неприметная звездочка 16-й величины в созвездии Ориона внезапно выросла в яркости, достигнув величины 10.1^m к концу 1936 г. и величины 9.7^m к концу 1937 г. [1, 2]. Звезду, которая получила обозначение FU Ori, сочли новой, хотя и по длительности подъема блеска (около 120 дней), и по длительности спада блеска

© Вибе Д. З., Воробьев Э. И., Акимкин В. В., Павлюченков Я. Н., 2017

(характерное время составляет порядка 100 лет) она заметно отличалась от других новых [1]. Только в 1966 г. Дж. Хербиг [2] высказал предположение, что вспышка FU Ori каким-то образом связана с ранней звездной эволюцией. Более детально связь FU Ori с процессом звездообразования была рассмотрена Хербигом в 1977 г. [3], когда было известно уже несколько подобных объектов, в честь звезды-прототипа получивших название фуоров. Согласно [4] идею о том, что вспышки на фуорах связаны с неустойчивостями в аккреционном диске, первым в 1976 г. высказал Богдан Пачинский.

Первый представитель другой подобной группы объектов привлек к себе внимание в 1944 г. Это была звезда HV 11976 в созвездии Волка [5], которая в спокойном состоянии имеет блеск около 13^m , но время от времени, с интервалами более нескольких лет, испытывает увеличение яркости как минимум на две звездные величины. Изначально она, как и FU Ori, считалась новоподобной, но уже в 1950 г. Хербиг показал [6], что это звезда типа Т Тау, ассоциированная с темным облаком. Поскольку данная звезда в издании ОКПЗ 1948 г. получила обозначение EX Lup, родственные объекты стали называться эксорами.

Сравнительные характеристики фуоров и эксоров приводятся в таблице по данным из доклада Джоеля Грина на конференции «Protostars and Planets VI» (http://www.mpia.de/homes/ppvi/talks/audard_green.pdf). В целом объекты обоих типов считаются сейчас представителями молодых звездных объектов (МЗО) классов I и II, эруптивная переменность которых связана с эпизодическими усилениями темпа аккреции. Аккреционные вспышки светимости на эксорах повторяются сравнительно часто, раз в несколько лет. Светимость нарастает быстро и так же быстро спадает. Светимость фуоров нарастает медленнее, а потом очень долго остается примерно на постоянном уровне. Фактически все известные фуоры находятся сейчас в состоянии вспышки, за исключением звезды V346 Nor [7]. Эта звезда, вспыхнув в 1980-е гг., к 2010 г. потеряла в блеске несколько звездных величин, что указывает на переход в спокойное состояние. Таким образом, длительность вспышки оказалась около 25 лет, то есть больше, чем у эксоров, но меньше, чем у фуоров. Довольно значительный спад яркости наблюдается также у звезды V1057 Cyg [8]. Это может быть указанием на то, что принципиальных различий между двумя этими классами нет.

Свойство	FU Ori	EX Lup
Сила вспышки	$4-6^m$, $20-500 L_{\odot}$	$3-5^m$, $0.5-20 L_{\odot}$
Повторяемость	Неизвестно	Раз в несколько лет
Темп аккреции	$> 10^{-6}-10^{-4} M_{\odot}$ в год	$10^{-7}-10^{-5} M_{\odot}$ в год
Туманность	Всегда	Иногда
Спектр	F—M	K—M
Класс МЗО	I/II	II?
Нарастание блеска	0.3—10 лет	0.1—0.3 года
Спад блеска	$>20-100$ лет	0.5—2 года

Эпизодическая аккреция

Сейчас считается, что МЗО классов I и II окружены газопылевыми дисками, масса которых велика на эволюционной стадии, соответствующей классу I, и постепенно снижается к окончанию эволюционной стадии, соответствующей классу II (в объектах класса III диск, по крайней мере газовый, уже практически отсутствует; см. табл. 1 в работе [9]). Через этот диск вещество продолжает аккрецировать на формирующуюся звезду, падая на ее фотосферу почти в режиме свободного падения со скоростью около 300 км/с [10]. Формирующиеся ударные волны, а также, вероятно, взаимодействие с магнитным полем нагревают вещество до температуры порядка 10^4 К, в результате чего в спектре звезды появляются значительный ультрафиолетовый избыток, а также эмиссионные линии. Горячая область диска вблизи звезды является источником излучения в ближнем инфракрасном диапазоне.

Калибровки аккреционной светимости показывают, что у звезд типа Т Тау (объекты класса II) при массе диска порядка $0.01 M_{\odot}$ типичный темп аккреции равен $\sim 10^{-8}-10^{-9} M_{\odot}$ в год. У несколько более молодых объектов, принадлежащих классу I, темп спокойной аккреции составляет около $10^{-6}-10^{-7} M_{\odot}$ в год. Последняя величина оказывается существенно ниже теоретических оценок темпа выпадения вещества на протозвезду, что привело к формулированию так называемой «проблемы светимости» [11]: ожидаемому для протозвезд темпу аккреции $2-5 \times 10^{-6} M_{\odot}$ в год должна соответствовать гораздо большая светимость, чем та, что реально наблюдается.

Авторы работы [11] предположили, что эту проблему можно решить, если вещество не сразу падает на звезду, а сначала накапливается в околозвездном диске. При этом ожидаемый высокий темп аккреции соответствует выпадению вещества из протозвездной оболочки на диск, а наблюдаемый низкий темп аккреции — выпадению вещества из диска на звезду. Для обеспечения баланса необходимо, чтобы время от времени темп выпадения вещества на звезду сильно возрастал. Таким образом, большую часть своей жизни протозвезда проводит в состоянии с низким темпом аккреции (и, следовательно, с низкой светимостью), которое перемежается краткими, но интенсивными эпизодами повышенной аккреции и светимости, проявляющимися в виде явлений типа FU Ori.

В работе [12] сравнивались результаты фотометрических наблюдений примерно 4000 протозвезд при помощи космических телескопов “Spitzer” и WISE, проведенные с интервалом в пять лет. У нескольких протозвезд за это время яркость в ИК-диапазоне выросла на одну звездную величину, указывая на возможную вспышку светимости. Если эта интерпретация верна, средний интервал между вспышками звезд типа FU Ori составляет от 5 000 до 50 000 лет.

В рамках этого предположения эксоры могут представлять собой объекты на несколько более поздней эволюционной стадии, в которых из-за общего снижения массы диска и темпа аккреции вспышки получаются менее мощными и менее длительными. Современные наблюдения указывают, что темп аккреции испытывает вариации и на меньших масштабах. Мониторинг протозвезд в облаках ОМС-2 и ОМС-3 («волокно в форме интеграла») показал, что примерно у половины из них светимость испытывает колебания с амплитудой более 20 % на временах порядка нескольких недель [13]. Есть наблюдения хаотических вариаций светимости и с меньшей временной шкалой («фликеринг», менее одного дня), а также квазипериодических колебаний.

Следует отметить, что вариации темпа аккреции с разными амплитудами и характерными временами могут вызываться разными причинами [14]. В последнее время появилась информация об объектах, которые испытывают короткие вспышки аккреции на ранних эволюционных стадиях. Отмечены также длительные вспышки аккреции на классических звездах типа Т Тау [15].

Несмотря на привлекательность предположения о связи вспышек светимости с эпизодической аккрецией, механизм или механизмы, приводящие к нарушению однородности диска и связанным с

этим вариациям темпа аккреции, до сих пор не вполне понятны. Предложены различные объяснения, например, тепловая неустойчивость, связанная с ионизацией водорода, взаимодействия в двойных системах (сама звезда FU Ori является двойной), сближения с другими звездами в скоплениях, формирование плотных сгустков в гравитационно-неустойчивом диске, взаимодействия диска с формирующимися планетами, магнито-вращательная неустойчивость во внутреннем диске, подпитываемая гравитационно-неустойчивым внешним диском [16], и т. д. Ни одно из этих объяснений не является общепринятым.

В значительной степени это связано с трудностями моделирования. Для исследования причин эпизодической аккреции необходима модель, которая, во-первых, включала бы в себя не только диск, но и окружающую оболочку, — для обеспечения высокого темпа аккреции в фуорах требуется постоянная подпитка диска веществом. Во-вторых, в модели должна описываться азимутальная структура диска, а это означает ограниченную возможность использования традиционных так называемых 1+1D моделей (см., напр., [17]), в которых рассматривается структура диска в широком диапазоне радиусов, но на одном азимуте, или моделей типа «shear box», в которых рассматривается фрагмент диска, ограниченный по радиусу и азимуту.

Детальная модель азимутальной и радиальной структуры диска на протяжении многих лет разрабатывается одним из авторов этого обзора [18–21]. В данной модели эволюция диска рассматривается с учетом наличия околодискковой оболочки, из которой в диск поступает вещество. Диск рассматривается в рамках 2D приближения: проинтегрированные в вертикальном направлении параметры диска варьируются по радиусу и по азимуту. При помощи этой модели было показано, что гравитационная неустойчивость действительно способна приводить к фрагментации диска и выделению в нем спиральных ветвей и плотных сгустков. Падение этих сгустков на звезду обуславливает вспышки светимости. Для реализации вспышечного режима аккреции необходимо, чтобы темп аккреции вещества из оболочки превышал $10^{-6} M_{\odot}$ в год, что характерно для протозвездных оболочек с температурами 10–30 К. При постепенном убывании темпа аккреции система сначала испытывает короткие, но сильные вспышки светимости ($\sim 100 L_{\odot}$), а затем переходит в режим фликеринга.

В настоящее время модель усовершенствована в рамках 2+1D приближения, в котором информация о температуре и плотности вещества диска используется для восстановления его вертикальной структуры. Это приближение позволяет более детально исследовать перенос излучения вспышки в диске и оценивать его вклад в тепловую структуру диска. Наличие переноса излучения и детальный расчет тепловой структуры диска позволяют перейти к решению более сложной задачи — к оценке того, как вспышка аккреции в центре диска влияет на его химический состав.

Химические последствия вспышек

Одной из ключевых проблем в исследовании звезд типа FU Ori является недостаток информации о том, как они выглядят в спокойном состоянии. Из-за очень медленного спада яркости почти все звезды, классифицированные как фуоры, все еще находятся в состоянии вспышки. Упомянутая выше звезда V346 Nor [7] не решила эту проблему, так как на ней уже началась новая вспышка (это, кстати, может быть проявлением предсказанных в работе [21] серийных вспышек).

Неоднократно высказывалось предположение, что признаки прошлых вспышек могут длительное время сохраняться в молекулярном составе диска. Выявление таких признаков, возможно, пролило бы свет на механизм вспышек, поскольку позволило бы исследовать особенности структуры диска не только во время, но и после вспышки светимости с целью выявления индикаторов, характерных для конкретного механизма. Например, вспышки, вызванные падением газопылевых сгустков, могут происходить только в массивных гравитационно-неустойчивых дисках с сильными, но нерегулярными спиральными рукавами, тогда как вспышки, происходящие вследствие прохождений других объектов (молодых звезд) в окрестностях протопланетного диска, должны сопровождаться генерацией более регулярной двухрукавной структуры. Вспышки, вызванные процессами во внутреннем диске (магниторотационная или тепловая неустойчивость) не требуют обязательной сильной неустойчивости во внешнем диске и могут работать, когда внешний диск обладает слабой флоккулентной структурой. Эти наблюдательные проявления могут стать ключом к пониманию механизмов вспышек. Но для

работы с этими наблюдениями необходимо понимать, как именно вспышка светимости влияет на содержание различных наблюдаемых индикаторов (молекул и пыли).

В качестве одного из таких индикаторов предложен лед CO_2 . В работе [22] представлены результаты наблюдений 19 МЗО довольно низкой светимости (меньше $1 L_\odot$) при помощи спектрографа IRS космического телескопа «Spitzer». Оказалось, что в спектрах как минимум шести исследованных МЗО присутствуют признаки чистого кристаллического льда CO_2 , в том числе в спектре источника со светимостью $0.08 L_\odot$. По мнению авторов, формирование чистого льда CO_2 (без значительного количества льда CO) возможно при условии прогрева пылинок, который исследованные МЗО низкой светимости в их текущем состоянии обеспечить не могут. Поэтому химический состав ледяных мантий в этих объектах является признаком прошлых вспышек светимости (см. также [23]).

Вымораживание и испарение CO , CO_2 и некоторых других молекул рассматривались в качестве индикатора вспышек светимости в ряде других работ. В работе [24] высказывается предположение, что отслеживать прошлую тепловую историю протозвездных объектов, влияющую на формирование и испарение CO из ледяных мантий пылинок, можно по относительному содержанию CO и N_2H^+ . Виссер и Бергин [25] при помощи однозонной химической модели исследовали эволюцию содержания различных молекул при вспышке светимости и обнаружили, что ее главным результатом является испарение CO с поверхности пылевых частиц (в результате которого на пылинках остается только чистый лед CO_2). Избыток CO в газовой фазе может сохраняться в течение 10^3 – 10^4 лет после вспышки. Этот вывод был подтвержден с использованием глобальной модели диска в работе [26] (см. также [27]).

В работе [28] влияние вспышки на химический состав диска исследовалось при помощи набора сферических оболочек. Было показано, что помимо CO признаки прошлой вспышки можно увидеть в линиях молекул HCO^+ и N_2H^+ . Прогрев диска также приводит к десятикратному расширению снеговой линии водяного льда, которая возвращается в исходное положение через 10^2 – 10^3 лет после вспышки. Однако использование сферически-симметричной модели не позволило использовать ее результаты для детального предсказания результатов наблюдений.

Наблюдательная проверка роли газофазного содержания CO представлена в работе [29]. Ее авторы использовали интерферометр

SMA для картирования излучения C^{18}O в 16 протозвездах на внедренной стадии эволюции. Выяснилось, что в восьми случаях протяженность эмиссии газофазных CO не согласуется с текущим значением светимости объекта (при которой значительно большая доля CO должна быть выморожена на пыли). Статистические оценки (впрочем, сделанные по очень маленькой выборке) указывают, что в исследованных протозвездах вспышки светимости происходят примерно каждые 20 000 лет.

Увеличение содержания молекул CO, воды и гидроксила в непосредственных окрестностях звезды EX Lup (на расстоянии порядка 0.2–0.3 а. е.) было обнаружено во время вспышки 2008 г. [30]. В этот период темп аккреции на звезду увеличился до значения 10^{-8} – $10^{-7} M_{\odot}$ в год, а к 2014 г. вернулся к «нормальному» значению порядка $10^{-10} M_{\odot}$ в год. Оценки показывают, что в спокойном состоянии масса молекулярного газа в ближнем диске уменьшилась на порядок величины. Отметим, что возвращение к «нормальному» молекулярному составу произошло всего за несколько лет, то есть гораздо быстрее, чем это предсказывается для звезд типа FU Ori, что, скорее всего, вызвано отсутствием протяженного диска/оболочки с низкой плотностью вещества.

Существуют также другие исследования, в которых, в частности, исследуется зависимость отношения D/H в молекулах воды от истории светимости в диске [31]. Возможная роль вспышек в обогащении диска сложными органическими соединениями рассмотрена в работе [32].

Нами разработана модель химической эволюции диска, в которой используются физические условия до, во время и после вспышки, рассчитанные при помощи 2+1D модели, что позволяет нам моделировать трехмерное распределение молекул при максимально реалистичном представлении структуры диска. Используемая химическая модель описана в работе [33]. Расчет проводится следующим образом. Сначала на протяжении 5 000 лет диск эволюционирует только химически на стационарной физической структуре. Затем на протяжении 100 лет происходит вспышка аккреции, в ходе которой структура диска соответствует существенно более высокой светимости, после чего физические условия в диске возвращаются к прежнему состоянию.

На рисунке показаны радиальные профили лучевых концентраций молекул CO и N_2H^+ для избранного азимута и трех моментов времени. Сплошной линией показано содержание молекулы непо-

средственно перед началом вспышки. Штриховая линия соответствует окончанию вспышки. Пунктирные линии — распределения лучевых концентраций через 200 лет после окончания вспышки.

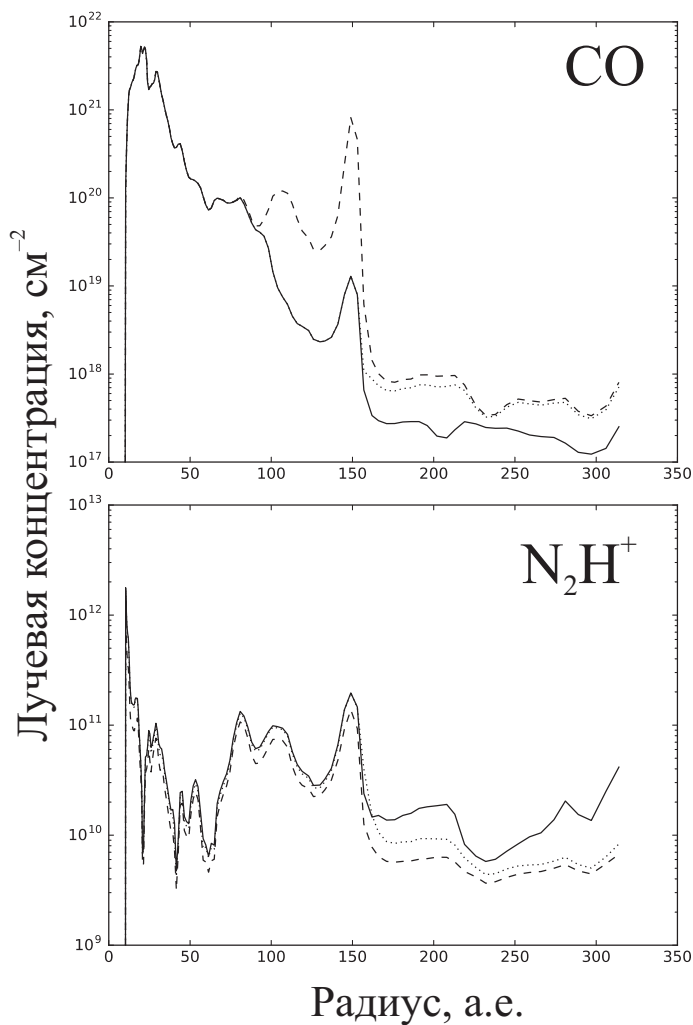
Эффект вспышки виден в распределении СО только на расстояниях свыше 70 а. е. от звезды, там, где до вспышки молекулы СО были в основном выморожены на пыли. На расстоянии более 150 а. е. вспышка приводит к повышению лучевой концентрации СО в несколько раз, и это повышенное содержание сохраняется как минимум несколько сотен лет после вспышки. Переход СО из твердой в газовую фазу приводит к разрушению молекул N_2H^+ , и потому в результате вспышки их содержание на длительное время уменьшается. Кроме того, вспышка ведет к резкому повышению газофазного содержания CO_2 , однако эти молекулы вымораживаются на пылинках практически сразу же после вспышки.

В дальнейшем, чтобы сопоставить результаты численного моделирования с результатами наблюдений, мы предполагаем использовать инструменты, позволяющие строить синтетические наблюдения как теплового излучения пыли, так и молекулярных эмиссионных линий. Это позволит нам непосредственно сравнивать результаты расчетов с данными наблюдений.

Дополнительные вопросы

В заключение кратко затронем еще несколько вопросов. Первый из них касается возможного вклада вспышек аккреции в решение проблемы образования массивных звезд [34]. Суть этой проблемы состоит в том, что в массивных протозвездах температура, необходимая для зажигания термоядерных реакций, достигается до окончания главной фазы аккреции, и в сферически-симметричном случае излучение родившейся звезды должно остановить рост ее массы на некоем предельном значении (около $10\text{--}20 M_\odot$), существенно меньшем, чем массы реально наблюдающихся массивных звезд. Преодолеть давление излучения звезды можно, если аккреция вещества на нее происходит не сферически-симметрично, а, например, через диск. В этом случае образование в диске массивных сгустков могло бы стать еще более эффективным способом «пробить» преграду излучения звезды [35]. Признаки эпизодической аккреции на массивные протозвезды также видны в наблюдениях [36].

В областях звездообразования вспышки аккреции на ранних эволюционных фазах могут быть важным механизмом обратной связи,



Результаты моделирования химической эволюции в диске до, во время и после вспышки. Сплошная линия — 5 000 лет после начала расчета (непосредственно перед вспышкой), штриховая линия — 5 100 лет после начала расчета (окончание вспышки), пунктирная линия — 5 300 лет после начала расчета (200 лет после окончания вспышки)

нагревающим газ не только в околозвездном диске, но и на существенно больших масштабах, регулируя тем самым темп звездообразования [37].

Наконец, некоторые признаки прошлой эпизодической аккреции мы можем увидеть и в Солнечной системе, например, в формировании и пространственном распределении так называемых кальций-алюминиевых включений (CAI). Их состав и структура указывают, что они сформировались в непосредственных окрестностях молодого Солнца при температуре порядка 1 300 К [38]. Между тем сейчас их находят в составе хондритов, значительная часть вещества которых не претерпевала значительного нагрева. События типа аккреционных вспышек в звездах типа FU Ori были предложены в качестве механизма транспортировки CAI на расстояния порядка нескольких астрономических единиц от Солнца, где они перемешивались с более холодным твердым веществом [39]. Подобный механизм предлагался и в качестве объяснения наличия кристаллических силикатных частиц в кометных ядрах [40].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 14–02–00719. Авторы благодарят Н. Н. Самуся за помощь в подготовке статьи.

Библиографические ссылки

1. *Hoffleit D.* Wachmann's Nova-Like Star: A Comparison with Other Peculiar Objects // Harvard College Observatory Bulletin. — 1939. — Vol. 911. — P. 41–48.
2. *Herbig G. H.* On the interpretation of FU Orionis // Vistas in Astronomy. — 1966. — Vol. 8. — P. 109–125.
3. *Herbig G. H.* Eruptive phenomena in early stellar evolution // Astrophys. J. — 1977. — Vol. 217. — P. 693–715.
4. *Trimble V.* The First European Conference on Astronomy // Q. J. R. Astron. Soc. — 1976. — Vol. 17. — P. 25–42.
5. *McLaughlin D. B.* The nova-like variable star HV 11976 // Astron. J. — 1946. — Vol. 52. — P. 109.
6. *Herbig G. H.* The Spectra of Five Irregular Variable Stars // Publ. Astron. Soc. Pac. — 1950. — Vol. 62. — P. 211.
7. *Kraus S., Caratti o Garatti A., Garcia-Lopez R. et al.* V346 Norma: first post-outburst observations of an FU Orionis star //

- Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2016. — Vol. 462. — P. L61–L65. 1607.03114.
8. Kóspál Á., Ábrahám P., Acosta-Pulido J. A. et al. The outburst and nature of two young eruptive stars in the North America/Pelican Nebula Complex // Astron. Astrophys. — 2011. — Vol. 527. — P. A133. 1011.4009.
 9. Williams J. P., Cieza L. A. Protoplanetary Disks and Their Evolution // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 2011. — Vol. 49. — P. 67–117. 1103.0556.
 10. Hartmann L., Herczeg G., Calvet N. Accretion onto Pre-Main-Sequence Stars // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 2016. — Vol. 54. — P. 135–180.
 11. Kenyon S. J., Hartmann L. W., Strom K. M., Strom S. E. An IRAS survey of the Taurus-Auriga molecular cloud // Astron. J. — 1990. — Vol. 99. — P. 869–887.
 12. Scholz A., Froebrich D., Wood K. A systematic survey for eruptive young stellar objects using mid-infrared photometry // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2013. — Vol. 430. — P. 2910–2922. 1301.3152.
 13. Billot N., Morales-Calderón M., Stauffer J. R. et al. Herschel Far-infrared Photometric Monitoring of Protostars in the Orion Nebula Cluster // Astrophys. J. Lett. — 2012. — Vol. 753. — P. L35. 1208.0135.
 14. Elbakyan V. G., Vorobyov E. I., Glebova G. M. Variations in the accretion rate and luminosity in gravitationally unstable protostellar disks // Astronomy Reports. — 2016. — Vol. 60. — P. 879–893.
 15. Audard M., Ábrahám P., Dunham M. M. et al. Episodic Accretion in Young Stars // Protostars and Planets VI. — 2014. — P. 387–410. 1401.3368.
 16. Armitage P. J., Livio M., Pringle J. E. Episodic accretion in magnetically layered protoplanetary discs // Mon. Not. R. Astron. Soc. — 2001. — Vol. 324. — P. 705–711. astro-ph/0101253.
 17. D'Alessio P., Cantö J., Calvet N., Lizano S. Accretion Disks around Young Objects. I. The Detailed Vertical Structure // Astrophys. J. — 1998. — Vol. 500. — P. 411–427. astro-ph/9806060.
 18. Vorobyov E. I., Basu S. The Origin of Episodic Accretion Bursts in the Early Stages of Star Formation // Astrophys. J. Lett. — 2005. — Vol. 633. — P. L137–L140. astro-ph/0510014.

19. *Vorobyov E. I., Basu S.* The Burst Mode of Protostellar Accretion // *Astrophys. J.* — 2006. — Vol. 650. — P. 956–969. astro-ph/0607118.
20. *Vorobyov E. I.* Variable Accretion in the Embedded Phase of Star Formation // *Astrophys. J.* — 2009. — Vol. 704. — P. 715–723. 0908.3645.
21. *Vorobyov E. I., Basu S.* Variable Protostellar Accretion with Episodic Bursts // *Astrophys. J.* — 2015. — Vol. 805. — P. 115. 1503.07888.
22. *Kim H. J., Evans N. J., II, Dunham M. M. et al.* CO₂ Ice Toward Low-luminosity Embedded Protostars: Evidence for Episodic Mass Accretion via Chemical History // *Astrophys. J.* — 2012. — Vol. 758. — P. 38. 1208.5797.
23. *Poteet C. A., Pontoppidan K. M., Megeath S. T. et al.* Anomalous CO₂ Ice toward HOPS-68: A Tracer of Protostellar Feedback // *Astrophys. J.* — 2013. — Vol. 766. — P. 117. 1302.3883.
24. *Lee J.-E.* Chemical Evolution in VeLLOs // *Journal of Korean Astronomical Society.* — 2007. — Vol. 40. — P. 83–89. 0712.1866.
25. *Visser R., Bergin E. A.* Fundamental Aspects of Episodic Accretion Chemistry Explored with Single-point Models // *Astrophys. J. Lett.* — 2012. — Vol. 754. — P. L18. 1206.5749.
26. *Vorobyov E. I., Baraffe I., Harries T., Chabrier G.* The effect of episodic accretion on the phase transition of CO and CO₂ in low-mass star formation // *Astron. Astrophys.* — 2013. — Vol. 557. — P. A35. 1307.2271.
27. *Frimann S., Jørgensen J. K., Padoan P., Haugbølle T.* Protostellar accretion traced with chemistry. Comparing synthetic C¹⁸O maps of embedded protostars to real observations // *Astron. Astrophys.* — 2016. — Vol. 587. — P. A60. 1512.00416.
28. *Visser R., Bergin E. A., Jørgensen J. K.* Chemical tracers of episodic accretion in low-mass protostars // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 577. — P. A102. 1503.04951.
29. *Jørgensen J. K., Visser R., Williams J. P., Bergin E. A.* Molecule sublimation as a tracer of protostellar accretion. Evidence for accretion bursts from high angular resolution C¹⁸O images // *Astron. Astrophys.* — 2015. — Vol. 579. — P. A23. 1504.02974.
30. *Banzatti A., Pontoppidan K. M., Bruderer S. et al.* Depletion of Molecular Gas by an Accretion Outburst in a Protoplanetary Disk // *Astrophys. J. Lett.* — 2015. — Vol. 798. — P. L16. 1412.1824.

31. *Owen J. E., Jacquet E.* Astro- and cosmochemical consequences of accretion bursts - I. The D/H ratio of water // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 446. — P. 3285–3296. 1410.6844.
32. *Taquet V., Wirström E. S., Charnley S. B.* Formation and Recondensation of Complex Organic Molecules during Protostellar Luminosity Outbursts // *Astrophys. J.* — 2016. — Vol. 821. — P. 46. 1602.05364.
33. *Kochina O. V., Wiebe D. S., Kalenskii S. V., Vasyunin A. I.* Modeling of the formation of complex molecules in protostellar objects // *Astronomy Reports.* — 2013. — Vol. 57. — P. 818–832.
34. *Tan J. C., Beltrán M. T., Caselli P. et al.* Massive Star Formation // *Protostars and Planets VI.* — 2014. — P. 149–172. 1402.0919.
35. *Meyer D. M.-A., Vorobyov E. I., Kuiper R., Kley W.* On the existence of accretion-driven bursts in massive star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 464. — P. L90–L94. 1609.03402.
36. *Kumar M. S. N., Contreras-Pena C., Lucas P. W., Thompson M. A.* Highly variable young massive stars in ATLASGAL clumps // *ArXiv e-prints.* — 2016. 1609.08711.
37. *Stamatellos D., Whitworth A. P., Hubber D. A.* Episodic accretion, protostellar radiative feedback, and their role in low-mass star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2012. — Vol. 427. — P. 1182–1193. 1209.0765.
38. *Connelly J. N., Bizzarro M., Krot A. N. et al.* The Absolute Chronology and Thermal Processing of Solids in the Solar Protoplanetary Disk // *Science.* — 2012. — Vol. 338. — P. 651.
39. *Wurm G., Haack H.* Outward transport of CAIs during FU-Orionis events // *Meteoritics and Planetary Science.* — 2009. — Vol. 44. — P. 689–699.
40. *Ábrahám P., Juhász A., Dullemond C. P. et al.* Episodic formation of cometary material in the outburst of a young Sun-like star // *Nature.* — 2009. — Vol. 459. — P. 224–226. 0906.3161.